УДК 539.1.074

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ СИЛЬНОТОЧНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Д.В. Гончаров, В.В. Ежов, А.И. Пушкарев, Г.Е. Ремнев

ФГНУ НИИ ВН. г. Томск
E-mail: aipush@mail.ru

Выполнены исследования неоднородности плотности энергии импульсного электронного пучка, формируемого планарным диодом с взрывоэмиссионным катодом. Представлена методика измерения распределения плотности энергии пучка в поперечном сечении с помощью дозиметрической пленки ПОР (5...50 кГр). Показано, что в диапазоне поглощенной дозы 5...120 кГр оптическая плотность пленки линейно увеличивается с ростом поглощенной дозы. Получена двумерная матрица значений плотности энергии, соответствующей автографу электронного пучка на дозиметрической пленке. Разработанная методика позволяет измерять неоднородность плотности энергии импульсного электронного пучка с пространственным разрешением лучше 1 мм при измерении абсолютных значений плотности энергии.

Введение

Широкое применение импульсных электронных пучков для накачки газовых лазеров, инициирования неравновесных плазмохимических процессов требует формирования электронных пучков большой площади (более 10 см^2) с высокой однородностью плотности энергии по сечению. Для измерения распределения энергии пучка в поперечном сечении обычно используют секционированный калориметр [1]. Для обеспечения пространственного разрешения профиля энергии электронного пучка около 1 мм при площади пучка более 20 см^2 требуется сложная конструкция калориметра, и процесс измерения занимает много времени. В работах [2, 3] для измерения распределения энергии импульсного электронного пучка в поперечном сечении предложена радиационно-акустическая диагностика. Она основана на регистрации акустических волн, возникающих в стержне при диссипации энергии электронного пучка. Выполненные исследования показали, что разрешающая способность такой диагностики при исследовании распределения энергии импульсного электронного пучка (450 кэВ, 6 кА, 50 нс) в поперечном сечении хуже 5 мм [4]. В работе [5] для анализа структуры импульсного электронного пучка в поперечном сечении предложено использовать люминесценцию природных минералов. Большое время послесвечения (более 10 мин) позволяет зарегистрировать профиль электронного пучка.

Для измерения поглощенной дозы при облучении непрерывными и импульсными электронными пучками широко используется дозиметрическая радиационно-чувствительная пленка (сополимер с фе-

назиновым красителем) типа ПОР [6]. Пленка рассчитана на измерение поглощенной дозы энергии электронного пучка в диапазоне от 5 до 50 кГр при измерении относительной оптической плотности на длине волны 512 нм. Толщина пленки составляет 0,1 мм (толщина чувствительного слоя 15 мкм), что позволяет регистрировать величину поглощенной дозы с высоким пространственным разрешением. При энергии электронов пучка более 200 кэВ потери в дозиметрической пленке незначительны.

Целью представленной работы является исследование пространственной неоднородности плотности энергии импульсного электронного пучка, формируемого планарным диодом с взрывоэмиссионным катодом, с помощью дозиметрической пленки ПОР. Также выполнена оценка корректности измерения поглощенной дозы выше 50 кГр с помощью дозиметрической пленки ПОР (5...50 кГр).

1. Экспериментальная установка и методика измерения

Работы выполнены на импульсном электронном ускорителе ТЭУ-500 [7]. Параметры электронного пучка: кинетическая энергия электронов 450...500 кэВ, длительность импульса на полувысоте 60 нс, энергия в импульсе 100 Дж, диаметр пучка 5 см. Ускоритель обеспечивал высокую повторяемость параметров формируемого электронного пучка, нестабильность величины полного тока электронного пучка не превышала 10 % [8]. На рис. 1 показана конструкция диодной камеры и узел вывода электронного пучка из вакуумного объема диодной камеры в реактор.

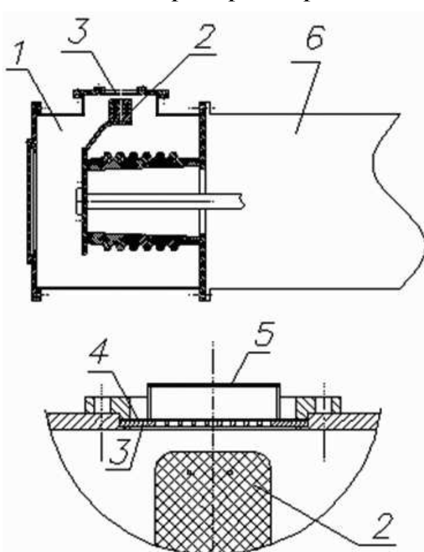


Рис. 1. *Выходной узел электронного ускорителя: 1) вакуумная камера диодного узла, 2) катод, 3) поддерживающая решетка, 4) анодная фольга, 5) дозиметрическая пленка, 6) наносекундный генератор*

Для сильноточных электронных пучков с энергией в импульсе более 50 Дж поглощенная доза за 1 выстрел превышает допустимый для пленки предел 50 кГр. Использование дозиметрической пленки, рассчитанной на более высокие значения поглощенной дозы (50...150 кГр), не позволяет зарегистрировать области поперечного сечения электронного пучка с малой плотностью энергии. Поэтому была выполнена проверка линейности зависимости оптической плотности дозиметрической пленки (5...50 кГр) от величины поглощенной дозы в области больших доз. Были выполнены измерения оптической плотности пленки при дискретном изменении поглощенной дозы, определяемой числом импульсов электронного пучка. На рис. 2 приведены зависимости величины поглощенной дозы, измеренной с помощью дозиметрической пленки, от числа последовательных импульсов электронного пучка. Величина поглощенной дозы рассчитывалась по калибровочной зависимости, прилагаемой изготовителем дозиметрической пленки. Эта зависимость была аппроксимирована в область доз более 50 кГр. Величина оптической плотности была измерена на спектрофотометре СФ-52 на длине волны 512 нм при размере области измерения 5×5 мм. Из рис. 2 видно, что с увеличением числа выстрелов величина поглощенной дозы растет линейно до величины 120 кГр.

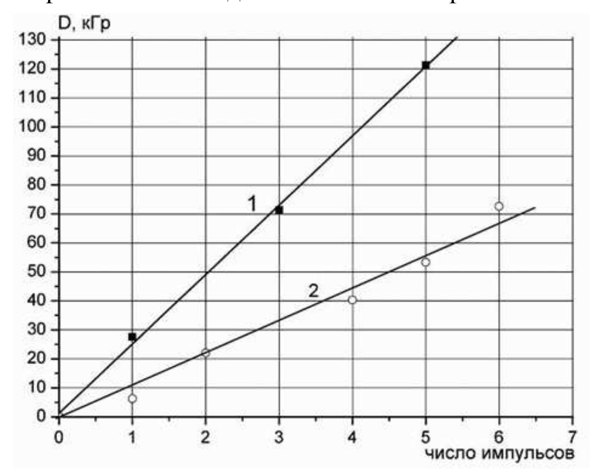


Рис. 2. *Зависимость поглощенной дозы от числа импульсов. Зависимости 1 и 2 соответствуют разной величине энергии электронного пучка за импульс*

Выполненные исследования показали, что динамический диапазон измерения поглощенной дозы с помощью дозиметрической пленки ПОР, для которой изготовители указывают диапазон доз 5...50 кГр, существенно шире и составляет 5...120 кГр. Этот диапазон больше, чем у дозиметрической пленки для более высоких величин поглощенной дозы (50...150 кГр).

Для измерения распределения плотности энергии импульсного электронного пучка в поперечном сечении необходимо измерение распределения оптической плотности (λ=512 нм) автографа пучка на дозиметрической пленке на большой площади с высоким пространственным разрешением. Использование для этих целей спектрофотометра позволяет работать в области линейной зависимости оптической плотности от поглощенной дозы, но значительно усложняет процесс измерения. Кроме того, при уменьшении диаметра зондирующего луча спектрофотометра меньше 5 мм возрастает погрешность измерения опти-

ческой плотности в области больших поглощенных доз. Для упрощения процедуры обработки дозиметрической пленки с автографом электронного пучка были выполнены исследования корреляции величины оптической плотности (λ=512 нм) дозиметрической пленки, облученной импульсным электронным пучком, и параметра "*light*" цифрового изображения пленки. Параметр "*light*" извлекался с помощью математического пакета MathCad 2001™ посредством встроенной в пакет функции из цифрового изображения пленки. Дозиметрические пленки были просканированы на сканере HP Scanjet 3970™ при использовании режима сканирования слайдов с аппаратным пространственно-цветовым разрешением 1200 dpi RGB с предварительно наложенным светофильтром. Полоса пропускания светофильтра 510...520 нм. Параметр "*light*" обеспечивал лучшую корреляцию с оптической плотностью пленки, измеренной спектрофотометром (λ=512 нм).

Величина поглощенной дозы варьировалась числом импульсов электронного пучка и расстоянием от выводного окна ускорителя. Измерения выполнены на образцах из дозиметрической пленки ПОР с размером 20×30 мм^2. На рис. 3 приведена зависимость поглощенной дозы, рассчитанной по величине оптической плотности (λ=512 нм), от параметра "*light*" цифрового изображения образцов облученной дозиметрической пленки.

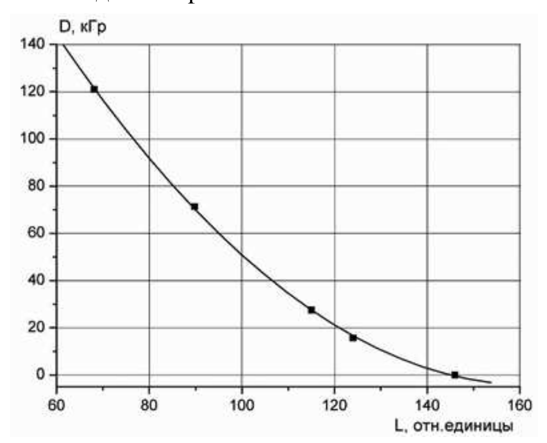


Рис. 3. *Зависимость поглощенной дозы D от параметра "light" цифрового изображения. Точки – экспериментальные данные, линия – аппроксимация функцией второго порядка*

Экспериментальные значения были аппроксимированы функцией:

$$D=370-4{,}6\cdot L+0{,}014\cdot L^2, \quad (1)$$

где L – параметр "*light*" цифрового изображения.

Погрешность аппроксимации составила 1,2 %. Аппроксимирующая функция для разных типов сканеров будет разной, но она легко рассчитывается по калибровочным образцам дозиметрической пленки. Монотонный характер зависимости параметра "*light*" цифрового изображения дозиметрической пленки от величины дозы, поглощенной в пленке, позволяет корректно измерять распределение поглощенной дозы по цифровому изображению автографа импульсного электронного пучка.

2. Расчет плотности энергии электронного пучка

По автографу импульсного электронного пучка на дозиметрической пленке можно определить распределение поглощенной дозы, что соответствует диссипации энергии электронного пучка в дозиметрической пленке. Для анализа однородности электронного пучка важно знать распределение полной энергии пучка по сечению.

Энергия электронного пучка, поглощенная на участке площадью S дозиметрической пленки, равна:

$$q=Dm=D\rho Sd, \quad (2)$$

где D – поглощенная доза, m, ρ и d – масса, плотность и толщина дозиметрической пленки соответственно.

Из соотношения (2) получим, что плотность энергии электронного пучка, поглощенной в дозиметрической пленке, равна:

$$j=q/S=D\rho d. \quad (3)$$

Двумерную матрицу поглощенной дозы, полученную при обработке цифрового изображения автографа импульсного электронного пучка, преобразуют по соотношению (3) в двумерную матрицу плотности энергии, поглощенной дозиметрической пленкой. Затем интегрированием двумерной функции распределения плотности энергии по сечению рассчитывают величину полной энергии Q, поглощенной в дозиметрической пленке. Эта энергия составляет фиксированную часть K_1 полной энергии электронного пучка. Для дозиметрической пленки с одинаковой толщиной и одинаковой чувствительностью к ионизирующему излучению можно принять, что коэффициент K_1 будет постоянным при всех последующих измерениях. Коэффициент K_1 был определен при измерении калориметром полной энергии выведенного электронного пучка и расчете полной энергии Q, поглощенной в дозиметрической пленке. Для построения двумерного распределения плотности энергии электронного пучка двумерная матрица значений плотности энергии, поглощенной дозиметрической пленкой, преобразовывалась в двумерную матрицу плотности энергии электронного пучка путем деления на коэффициент K_1. В дальнейших измерениях двумерную матрицу поглощенной дозы сразу преобразовывали в матрицу плотности энергии электронного пучка умножением значений поглощенной дозы на коэффициент $K=\rho d/K_1$.

Обработка автографа импульсного электронного пучка на дозиметрической пленке производилась в следующем порядке:

- сканирование пленок с высоким (в пределах, ограниченных аппаратным разрешением сканера) разрешением по цвету и по координате,
- составление из полученного цифрового изображения двумерной матрицы параметра "*light*",
- обработка матрицы параметра "*light*" по функции (1), составление матрицы поглощенной дозы,
- преобразование матрицы поглощенной дозы в матрицу значений плотности энергии электронного пучка,
- представление матрицы плотности энергии электронного пучка в виде двумерного графика.

3. Исследование пространственного распределения плотности энергии импульсного электронного пучка

На рис. 4 представлено типичное двумерное распределение плотности энергии импульсного электронного пучка (один импульс), полученное по изложенному выше алгоритму. Анодная фольга ускорителя лежит на опорной решетке с прорезями шириной 5 мм (рис. 1). Материал катода – графит.

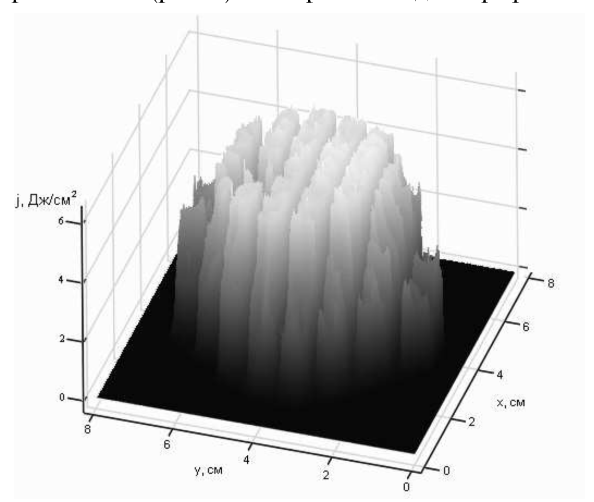
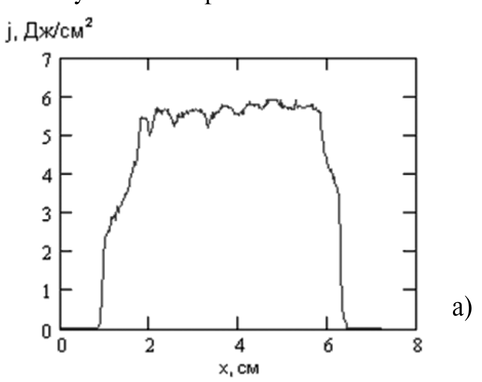


Рис. 4. Двумерное распределение плотности энергии импульсного электронного пучка в поперечном сечении

На рис. 5 представлены сечения двумерного распределения (рис. 4) плотности энергии электронного пучка в поперечном сечении.



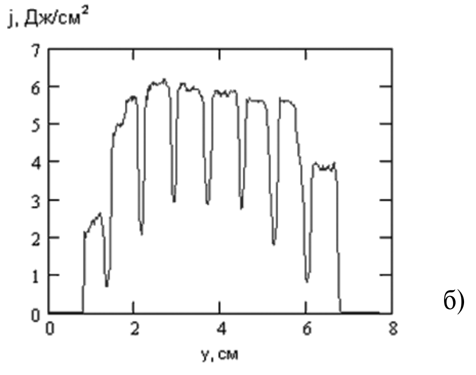


Рис. 5. Распределение плотности энергии электронного пучка по сечениям двумерного изображения рис. 4: а) вдоль прорези в поддерживающей решетке, б) поперек прорези

На рис. 4 и 5 отчетливо видны области ребер жесткости поддерживающей решетки шириной 2 мм, которые закрывают дозиметрическую пленку от воздействия импульсного электронного пучка.

На рис. 6 приведено пространственное распределение плотности энергии электронного пучка, формируемого диодом с катодом из углеродной ткани.

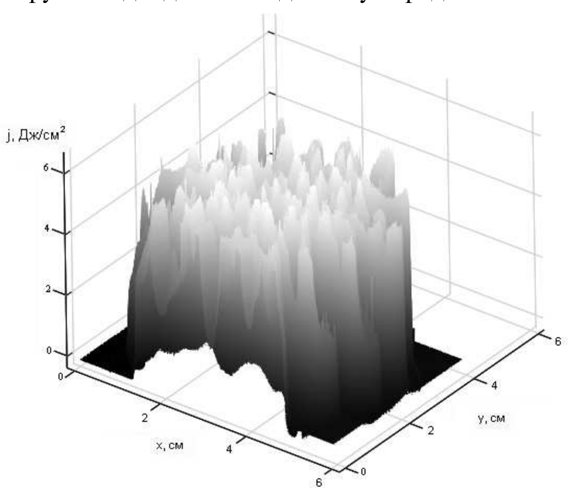


Рис. 6. Пространственное распределение плотности энергии импульсного электронного пучка

Из рис. 4–6 видно, что использование дозиметрической пленки ПОР для визуализации сильноточного импульсного электронного пучка позволяет получить пространственное разрешение лучше 1 мм.

4. Разработка методики количественной оценки неоднородности электронного пучка

Двумерное представление распределения плотности энергии электронного пучка наглядно демонстрирует микроструктуру электронного пучка в поперечном сечении. Но анализ степени неоднородности электронного пучка, сравнение различных режимов генерации пучка и различных типов электронных диодов по таким зависимостям вы-

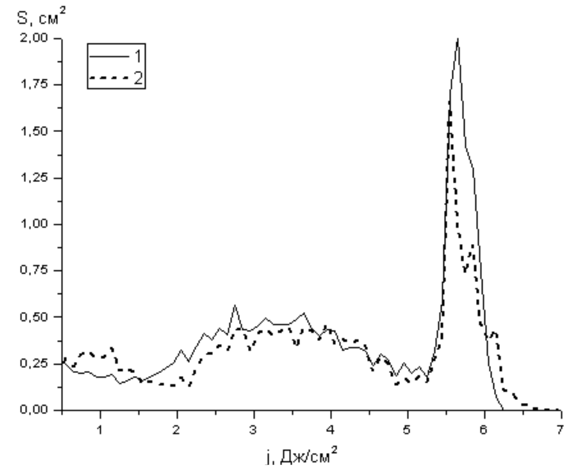


Рис. 7. Гистограмма распределения плотности энергии электронного пучка: 1) графитовый катод, 2) катод из углеродной ткани

полнять сложно. Поэтому двухмерная матрица плотности энергии электронного пучка преобразовывалась в гистограмму значений плотности энергии, рис. 7. По горизонтальной оси отложены значения плотности энергии импульсного электронного пучка, а по вертикальной – суммарная площадь поперечного сечения электронного пучка с такой плотностью энергии.

Заключение

Дозиметрическая пленка ПОР (5...50 кГр) позволяет измерять неоднородность плотности энергии импульсного электронного пучка с разрешением лучше 1 мм в диапазоне поглощенных доз 5...120 кГр. Разработанная методика обработки автографа электронного пучка на дозиметрической пленке позволяет значительно упростить и автоматизировать анализ результатов экспериментов. Сравнение степени неоднородности электронного пучка в поперечном сечении для разных режимов по гистограмме распределения плотности энергии электронного пучка более информативно, чем сравнение двумерных изображений.

Авторы выражают благодарность проф. В.Ю. Яковлеву за полезные консультации и помощь в измерении оптической плотности.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, программа «Развитие научного потенциала высшей школы», грант № 416.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москалев В.А., Сергеев Г.И. Измерение параметров пучков заряженных частиц. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
2. Батыгин Ю.В., Воловик В.Д., Иванов С.И., Карасев С.П. Об определении профиля пучка в ускорителе с помощью метода акустической дозиметрии // Приборы и техника эксперимента. – 1980. – № 4. – С. 24–26.
3. Воловик В.Д., Иванов С.И. К вопросу о термоупругой дозиметрии пучков заряженных частиц // Журнал технической физики. – 1975. – № 8. – С. 1789–1791.
4. Ремнев Г.Е., Пушкарев А.И., Ежов В.В. Радиационно-акустическая диагностика профиля импульсного электронного пучка // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Матер. 11 Междунар. научной школы-семинара. – Николаев, 2003. – С. 77–78.
5. Липчак А.И., Михайлов С.Г., Соломонов В.И. Визуализация сильноточных импульсных электронных пучков // Приборы и техника эксперимента. – 1997. – № 2. – С. 78–80.
6. Генералова В.В., Гурский М.Н. Дозиметрия в радиационной технологии. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 184 с.
7. Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., Пушкарев А.И., Карпузов С.Б., Кондратьев Н.А., Гончаров Д.В. Импульсный сильноточный ускоритель с согласующим трансформатором // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 3. – С. 130–134.
8. Гончаров Д.В., Приходько А.В. Исследование стабильности работы импульсного электронного ускорителя с согласующим трансформатором // Перспективы развития фундаментальных наук: Труды 1 Всерос. конф. студентов и молодых ученых. – Томск, 2004. – С. 19–21.

УДК 621.039.51:541.126